

УДК 621.787.4

В. Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН, М. С. МАХАЛОВ

**НАСЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
В ПРОЦЕССАХ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ***Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, Кемерово**(Поступила в редакцию 17.07.2015)*

Известно, что остаточные напряжения (ОН) первого рода являются одним из ключевых параметров состояния металла ответственных деталей машин и промышленных конструкций, в значительной степени определяющих их эксплуатационную долговечность. Особенно велико влияние ОН на долговечность при различных видах знакопеременных нагрузок; при этом важную роль играет как величина, так и характер распределения ОН по сечению деталей. Известно, что при появлении на поверхности детали концентратора напряжений или начальной трещины положительное влияние сжимающих ОН в поверхностном слое (ПС) резко возрастает и может привести к увеличению долговечности детали в несколько раз [1].

Основным условием возникновения ОН первого рода является неравномерная в том или ином сечении детали пластическая деформация механической или тепловой природы. Однако в силу сложности процессов силового и температурного нагружения деталей на стадиях производства и эксплуатации точный расчет напряжений, действующих в той или иной части детали или конструкции, не всегда представляется возможным [2].

Большинство расчетных методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС) основано на использовании значительного числа допущений, идеализирующих расчетные схемы, действующие нагрузки и граничные условия, что дает существенные погрешности в оценке напряжений, а в ряде случаев приводит к невозможности получения теоретических решений.

Такая задача становится особенно актуальной, когда речь идет об определении ОН в процессах механической обработки и последующей эксплуатации в условиях сложных видов нагружения изделия. При этом важную роль играет технологическое наследование, определяющее формирование и трансформацию ОН исходя из сложной знакопеременной истории нагружения поверхностного слоя детали на предшествующих стадиях.

Среди методов механической обработки широкими возможностями по созданию в ПС благоприятных сжимающих ОН, близких по величине к пределу текучести металла, обладают способы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) (рис. 1) [3].

При обработке ППД в зоне контакта деформирующих инструментов с деталью возникает асимметричный очаг деформации (ОД) $ABCDEFGF$, характеризуемый линиями контура передней внеконтактной ABC (зона 1), передней контактной CD (зона 2), задней контактной DE (зона 3) и задней внеконтактной EF (зона 4) поверхностей, а также линией FGA , описывающей границу зоны пластического течения металла. Вследствие деформации частицы металла смещаются в зоне волнообразования вдоль линий тока, формируя ПС детали (рис. 1). Начальные параметры состояния, которые частицы металла имели до входа в очаг деформации (линия AG), трансформируются к моменту их выхода из ОД (линия GF).

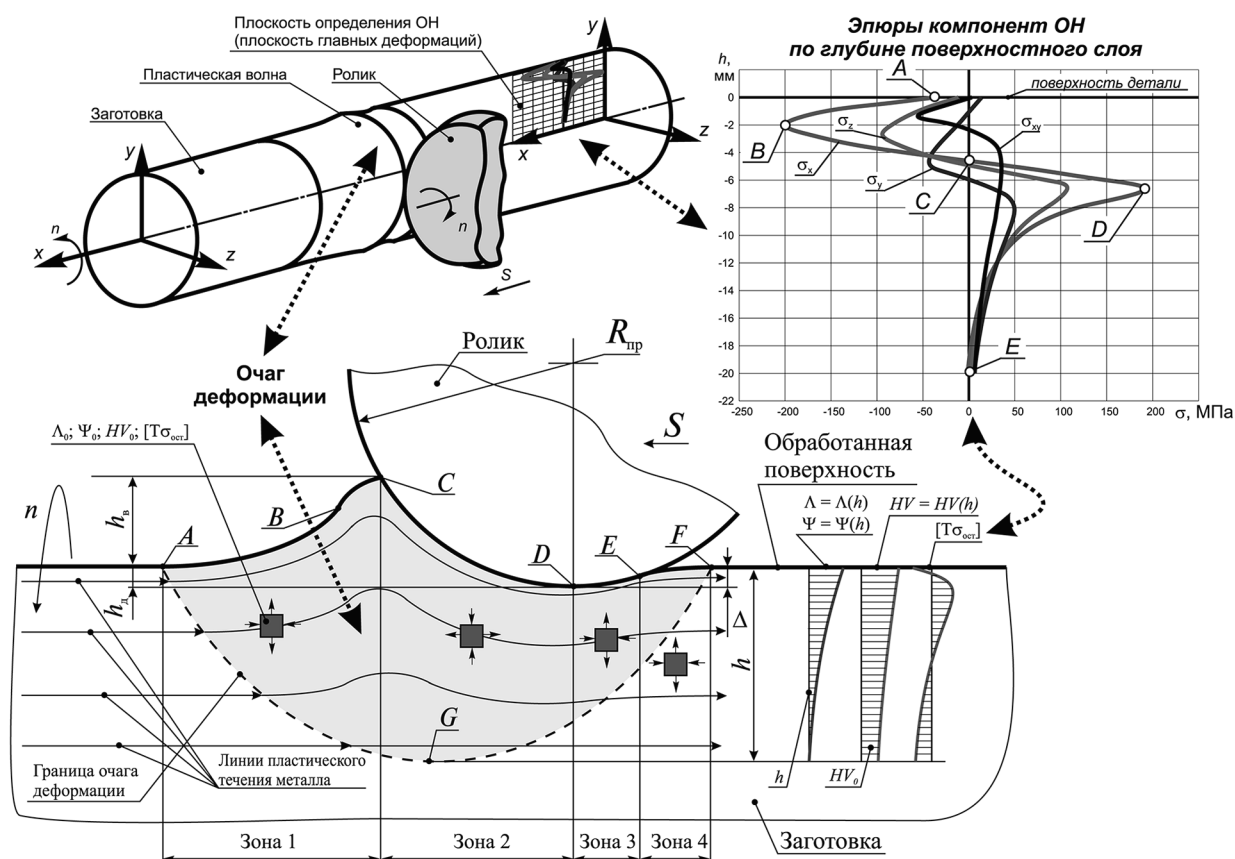


Рис. 1. Схема очага деформации в плоскости подачи при обработке ППД

Решение задачи аналитического определения ОН после сложных видов нагружения с учетом явления технологической наследственности возможно на основе аппарата механики деформируемых тел и методологии механики технологического наследования, в рамках которых [3]

формирование и трансформация ПС на стадиях механической обработки и последующего эксплуатационного нагружения рассматриваются как единый непрерывный процесс накопления деформации, истощения запаса пластичности и трансформации ОН металлом ПС. При этом наряду с традиционными параметрами качества для описания свойств ПС используются: накопленная степень деформации сдвига Λ , степень истощения запаса пластичности Ψ и компоненты тензора остаточных напряжений $[T\sigma_{ост}]$ в системе координат, связанной с формой детали или элемента конструкции;

формирование и трансформация ОН на стадиях механической обработки при изготовлении рассматриваются как следствие сложного немонотонного нагружения металла в очаге пластической деформации, при котором происходят накопление деформации и истощение запаса пластичности металлом ПС;

формирование ОН в условиях изменяющихся вследствие пластической деформации механических свойств металла, т. е. на протекание процессов в каждой точке траектории внутри ОД влияет история нагружения;

ОН проявляют себя в процессе эксплуатации, трансформируясь в каждом цикле эксплуатационного нагружения; долговечность определяется всей историей нагружения.

Согласно современным представлениям, тензор ОН представляет собой разность напряжений, возникающих в реальном упругопластическом теле при приложении нагрузки $[T\sigma_{деф}]$, и напряжений, которые возникали бы в идеально упругом теле при идентичном нагружении $[T\sigma_{раз}]$, суммированную с тензорами напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали $[T\sigma_{раскр. дет.}]$ и упругих тепловых напряжений разгрузки $[T\sigma_{\theta 0}]$ [4, 5]:

$$[T\sigma_{ост}] = [T\sigma_{деф}] - [T\sigma_{раз}] + [T\sigma_{раскр. дет.}] + [T\sigma_{\theta 0}]. \quad (1)$$

В соответствии с используемым аппаратом механики технологического наследования:

на каждой стадии механической обработки в ОД (как это представлено выше на примере обработки ППД) происходят непрерывное накопление деформации и исчерпание запаса пластичности, которые приводят к формированию ПС с определенными параметрами качества (глубина и степень упрочнения, шероховатость и остаточные напряжения);

при эксплуатационном усталостном нагружении продолжается процесс накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности, протекающий в условиях непрерывной релаксации остаточных напряжений. При накоплении предельных деформаций ($\Lambda = \Lambda_p$) происходит полное исчерпание запаса пластичности ($\Psi = 1$). Этому состоянию соответствуют релаксация тензора остаточных напряжений первого рода до пренебрежимо малых значений ($[T\sigma_{ост}] \approx 0$) и появление начальной усталостной трещины. Накопление предельных деформаций, полное исчерпание запаса пластичности и зарождение усталостной трещины происходят в некоторой точке вероятного разрушения, которая может быть расположена как на поверхности, так и на некотором удалении от нее;

результатирующее напряженное состояние определяется тензорами ОН и напряжений от внешней нагрузки. При совпадении направлений векторов главных напряжений для обеих составляющих и симметричном цикле усталостных напряжений ПС изделие работает в условиях асимметрии цикла, тем большей, чем больше остаточные напряжения. Среднее напряжение цикла при этом равно ОН, а амплитуда равна напряжению от внешней нагрузки. В условиях циклического нагружения сжимающие ОН повышают, а растягивающие ОН снижают усталостную долговечность;

на каждой стадии механической обработки или эксплуатации формирование ОН происходит под влиянием степени деформации, накопленной металлом на текущий момент времени; остаточных напряжений, сформированных на предыдущей стадии; механических и тепловых напряжений, возникающих при приложении нагрузки на рассматриваемой стадии нагружения; напряжений упругой разгрузки при снятии внешней нагрузки; напряжений, дополнительно возникающих при раскреплении детали.

По мнению авторов, повышение качества и надежности ответственных изделий машиностроения требует создания наследственной теории формирования ОН в очаге деформации на каждой стадии обработки и трансформации этих напряжений на каждой последующей стадии обработки и эксплуатационного усталостного нагружения.

Применительно к упрочняющей обработке ППД роликовым инструментом разработана конечно-элементная модель (МКЭ-модель) формирования остаточных напряжений исходя из механики деформирования в очаге деформации и рассчитаны вышеназванные интегральные деформационные параметры металла поверхностного слоя детали.

При создании модели приняты следующие начальные условия и допущения:

1. Возникающие деформации имели только механическую составляющую и соответственно формирование ОН происходило от механического нагружения; при этом тепловая составляющая не учитывалась.

2. Моделируемый материал принимался изотропным с параметрами механического состояния, соответствующими параметрам стали 45 (ГОСТ 1050–88) в состоянии поставки.

3. Использовалась билинейная аппроксимация кривой течения, учитывающая упрочнение металла (рис. 2, табл. 1); заданы – модуль Юнга E , характеризующий угол наклона упругого участка α ; экстраполированный предел текучести $\sigma_{\text{эт}}$, соответствующий отрезку на оси напряжений, определяемому продолжением участка пластического течения; коэффициент Пуассона ν ; тангенциальный модуль $T_{\text{мод}}$, характеризующий угол наклона участка пластического течения β (рис. 2, табл. 1).

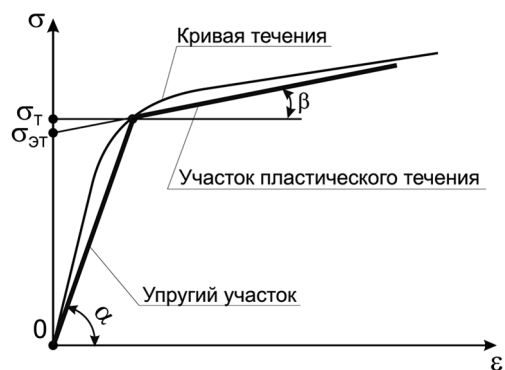


Рис. 2. Билинейная аппроксимация кривой течения

Т а б л и ц а 1. Значения параметров физических и механических свойств металла

Параметр	Значение
Модуль Юнга E , Па	$2 \cdot 10^{11}$
Плотность ρ , кг/м ³	7800
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Коэффициент трения η	0,21
Экстраполированный предел текучести $\sigma_{\text{эт}}$, Па	$3,66 \cdot 10^8$
Тангенциальный модуль $T_{\text{мод}}$, Па	$2,596 \cdot 10^9$

4. С целью упрощения расчетов на данном этапе не учитывался эффект Баушингера.

5. Тензор напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали принят нулевым, поскольку, с одной стороны, при обработке ППД выполнялся ряд условий, указанных А.Н. Овсеевко, для обработки симметричных цилиндрических деталей [6], а с другой, модель детали имела достаточно большие по сравнению с возникающим очагом деформации геометрические размеры. Это позволяет не учитывать влияния границ модели заготовки на значения компонент моделируемых напряжений.

Моделирование процесса обработки ППД – сложная задача в силу немонотонного нагружения в очаге пластической деформации. При этом смещение металла в плоскости главных деформаций имеет дискретный характер; ОД возникает со смещением относительно предыдущего на величину подачи, которая для ППД составляет 0,05–0,3 мм/об (рис. 1).

В ранее использованных постановках создавались МКЭ-модели, включающие в себя обрабатываемую заготовку и индентор (инструмент). Заготовка моделировалась как упругопластическое тело, а индентор – как абсолютно жесткое тело. При этом в МКЭ-моделях процессов ППД, резания и размерного совмещенного обкатывания указанная дискретность не моделировалась [3].

Верхняя граница модели обрабатываемой заготовки представляла собой контур ОД, восстановленный по соответствующей профилограмме. Зона контакта детали с роликом моделировалась в виде дуги окружности, радиус которой соответствовал профильному радиусу ролика (рис. 1). Нижняя граница модели жестко закреплялась по осям x и y . Индентору придавалось однократное смещение по оси x на величину подачи S .

Задача решалась в плоскодеформированной постановке. Это предполагало, что все деформационные процессы происходят в плоскости главных деформаций, проходящей через ось вращения обрабатываемой заготовки (плоскости подачи).

По мнению В.М. Смелянского, степень деформации металла ПС в процессах ППД взаимосвязана с размерами продольной волны. В пользу такой точки зрения автор приводит ряд аргументов [7]:

высота пластической волны в продольном направлении имеет значительно большие размеры, чем в поперечном направлении;

плоскость подачи с механической точки зрения в большей степени отвечает понятию плоскости главных деформаций, поскольку деформации в плоскости скорости вращения меньше аналогичных деформаций в плоскости подачи.

Особенностью такой постановки является то, что инструмент не взаимодействует со всей обрабатываемой поверхностью; моделируется лишь НДС в ОД, геометрические параметры которого получены на основе экспериментальных данных.

Расчеты выполнялись исходя из гипотезы, что на следующем этапе нагружения, которое происходит через 1 об детали, частица, смещаясь вдоль линии тока, меняет свое НДС на некоторое новое НДС, имеющее место в «мгновенной» модели и расположенное со смещением от прежнего НДС вдоль оси детали на величину подачи. При этом не учитывалось, что между этими двумя состояниями происходит разгрузка, приводящая к возникновению промежуточного НДС, а новый шаг нагружения происходит уже в условиях изменившихся на предыдущем шаге свойств металла.

Таким образом, в рамках данной модели сложного немонотонного нагружения частицы металла проходят вдоль очага деформации и на выходе из него формируют обработанный поверх-

ностный слой детали. Описанная постановка позволяла смоделировать «мгновенные» значения напряжений и деформаций и в результате рассчитать степени деформации сдвига Λ и истощения запаса пластичности Ψ .

Предлагаемая МКЭ-модель процесса ППД имеет следующие особенности:

многошаговое нагружение ПС детали, моделирующее в плоскости главных деформаций дискретный характер взаимодействия деформирующего ролика с ее поверхностью;

моделирование остаточных напряжений после обработки, а также на промежуточных этапах в очаге деформации;

учет технологического наследования (истории нагружения) путем оценки состояния металла при многократном нагружении – разгрузке в процессе перемещения частицы вдоль линии тока в очаге деформации

учет технологического наследования в пределах рассматриваемых стадий механической обработки и последующей эксплуатации в условиях усталостного нагружения.

Моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса ANSYS в плоскодеформированной постановке, использование которой, как было отмечено, предполагает, что деформационные процессы происходят только в рассматриваемой плоскости, а тензор напряжений является условно объемным.

Значения свойств металла и параметров кривой течения задавались по справочным материалам для стали 45 в состоянии поставки.

В качестве обрабатываемой поверхности моделировался фрагмент плоскости главных деформаций цилиндрической детали длиной $L = 50$ мм и высотой $h = 20$ мм (рис. 3). Нижняя и боковые границы фрагмента жестко закреплялись по обеим осям. Размеры возникающего при обработке очага НДС значительно меньше размеров моделируемого фрагмента, поэтому возникающие при такой постановке краевые эффекты вносят в результаты моделирования незначительную погрешность.

Индентор представлен как абсолютно жесткое тело в виде окружности, моделирующей (имитирующей) ролик заданного профильного радиуса. Правомерность такого допущения доказана многочисленными исследованиями процессов ППД, где не были обнаружены существенный износ или деформации роликов, шариков или выравнивающих инструментов.

На 1-м и любом последующем нечетном шаге моделирования осуществлялось нагружение – перемещение индентора в направлении поверхности на величину подачи 0,1 мм. Таким образом, индентор внедрялся в поверхность на величину действительного натяга.

Выбранные значения моделируемых параметров режима обработки ППД приведены в табл. 2.

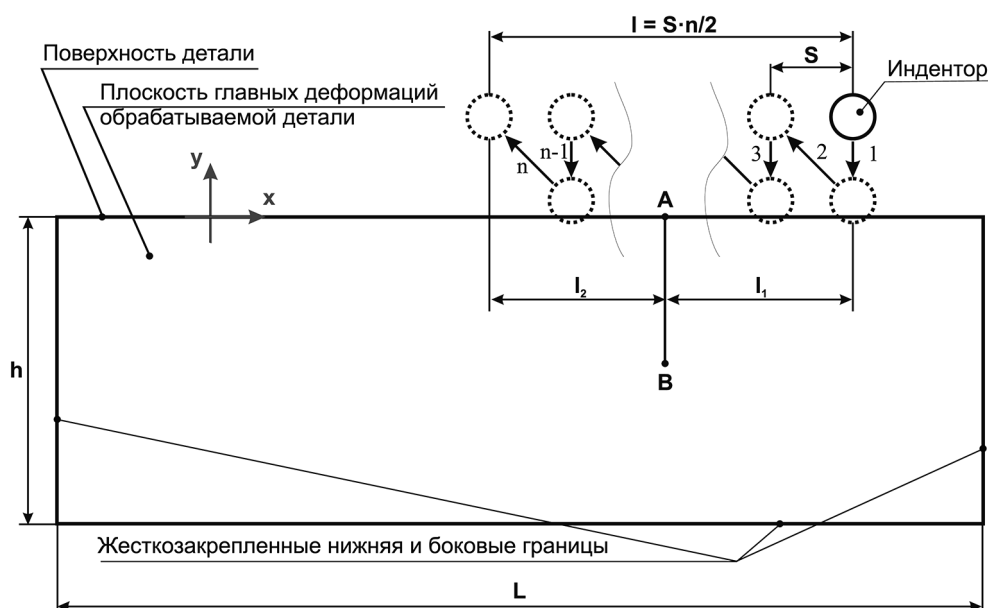


Рис. 3. Постановка задачи моделирования процесса обработки ППД

Т а б л и ц а 2. Параметры режима обработки ППД

Параметр режима	Значение в МКЭ-модели	Диапазон величин
Профильный радиус ролика $R_{пр}$, мм	5	1,6–16
Подача S , мм/об	0,1	0,05–0,25
Действительный натяг ролика h_d , мм	0,05	до 0,1 мм для стали 45

В исходном положении индентор находился относительно поверхности с некоторым зазором, равным 0,05 мм (рис. 3).

На 2-м и любом последующем четном шаге моделирования осуществлялась разгрузка – отвод индентора от поверхности на величину 0,1 мм с его одновременным перемещением вдоль поверхности на величину подачи.

Всего смоделировано 300 шагов – 150 шагов нагружения и 150 шагов разгрузки. При этом длина обработанной в представленной МКЭ-модели поверхности составила $l = S n/2 = 15$ мм.

Основная идея моделирования трансформации НДС и ОН в очаге деформации заключалась в следующем. Некоторое сечение AB моделируемого фрагмента расположено таким образом, что на 1-м шаге нагружения оно еще не попадает в пространство ОД. В то же время на предпоследнем шаге нагружения это сечение уже «покинуло» пространство ОД. Расстояние l_1 в направлении подачи от стартового положения индентора до сечения AB составило 5 мм, расстояние l_2 в направлении подачи от сечения AB до конечного положения индентора – 10 мм (рис. 3).

Таким образом, в процессе реализации всех шагов моделирования указанное сечение проходит через пространство ОД и является сечением по глубине обработанного ПС, в котором произошли накопление деформаций, частичное исчерпание запаса пластичности и формирование тензора ОН.

После получения решения модели в выделенном сечении для каждого шага моделирования фиксировались значения координаты узлов в сечении; составляющие вектора смещений узлов сечения; компоненты тензора напряжений; компоненты тензора суммарной упругопластической деформации.

Т а б л и ц а 3. Расчетные значения накопленных в очаге пластической деформации параметров механического состояния на уровне обрабатываемой поверхности (фрагмент)

Шаг нагружения	σ , МПа	T , МПа	P	Λ_p	Компоненты скорости деформации, c^{-1}			H , c^{-1}	$\Delta\Lambda$	Λ	Ψ
					ξ_x	ξ_y	ξ_{xy}				
1	–16,19	18,25	–0,887	2,2858	–5,81E-02	2,55E-02	–1,95E-02	9,41E-02	1,27E-04	0,0001	0,0001
2	–22,95	27,75	–0,827	2,1927	–3,34E-02	1,11E-02	–1,25E-03	4,64E-02	1,90E-04	0,0003	0,0001
3	–18,73	21,40	–0,875	2,2673	2,30E-02	–7,25E-03	–2,11E-03	3,18E-02	1,06E-04	0,0004	0,0002
4	–22,53	27,27	–0,826	2,1914	–2,14E-02	6,53E-03	2,15E-03	2,95E-02	8,28E-05	0,0005	0,0002
5	–20,82	23,85	–0,873	2,2640	1,34E-02	–3,16E-03	–3,74E-03	1,91E-02	6,56E-05	0,0006	0,0003
6–11	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	–36,49	44,56	–0,819	2,1804	–2,78E-02	8,02E-03	1,80E-03	3,78E-02	7,67E-05	0,0011	0,0005
13	–38,40	45,10	–0,851	2,2302	8,67E-04	2,51E-03	–7,96E-03	1,61E-02	7,28E-05	0,0011	0,0005
14	–39,74	48,57	–0,818	2,1794	–1,42E-02	2,56E-03	4,31E-03	2,00E-02	4,87E-05	0,0012	0,0005
15	–44,11	52,01	–0,848	2,2249	–8,51E-03	6,16E-03	–1,20E-02	2,81E-02	6,49E-05	0,0012	0,0006
16	–46,92	57,53	–0,815	2,1750	–2,14E-02	4,94E-03	3,84E-03	2,90E-02	7,71E-05	0,0013	0,0006
17	–44,58	52,93	–0,842	2,2161	1,79E-02	–4,25E-03	–3,87E-03	2,47E-02	7,25E-05	0,0014	0,0006
18	–46,66	57,22	–0,815	2,1749	–1,68E-02	3,87E-03	4,34E-03	2,37E-02	6,53E-05	0,0015	0,0007
19	–51,20	60,37	–0,848	2,2250	–6,66E-03	6,97E-03	–1,17E-02	2,71E-02	6,86E-05	0,0015	0,0007
20	–53,31	65,91	–0,809	2,1651	–2,25E-02	3,88E-03	5,16E-03	3,03E-02	7,75E-05	0,0016	0,0007
21	–56,27	66,91	–0,841	2,2141	6,96E-04	3,75E-03	–1,32E-02	2,67E-02	7,69E-05	0,0017	0,0008
22	–59,17	73,17	–0,809	2,1648	–2,48E-02	4,95E-03	4,27E-03	3,30E-02	8,05E-05	0,0018	0,0008

П р и м е ч а н и е: σ – среднее нормальное напряжение; T – интенсивность касательных напряжений; P – показатель схемы напряженного состояния; Λ_p – предельное (для данного показателя схемы напряженного состояния) значение накопленной степени деформации сдвига; H – интенсивность скоростей деформации; $\Delta\Lambda$ – приращение накопленной степени деформации сдвига за текущий шаг нагружения; Λ – текущее значение накопленной степени деформации сдвига; Ψ – текущее значение степени исчерпания запаса пластичности.

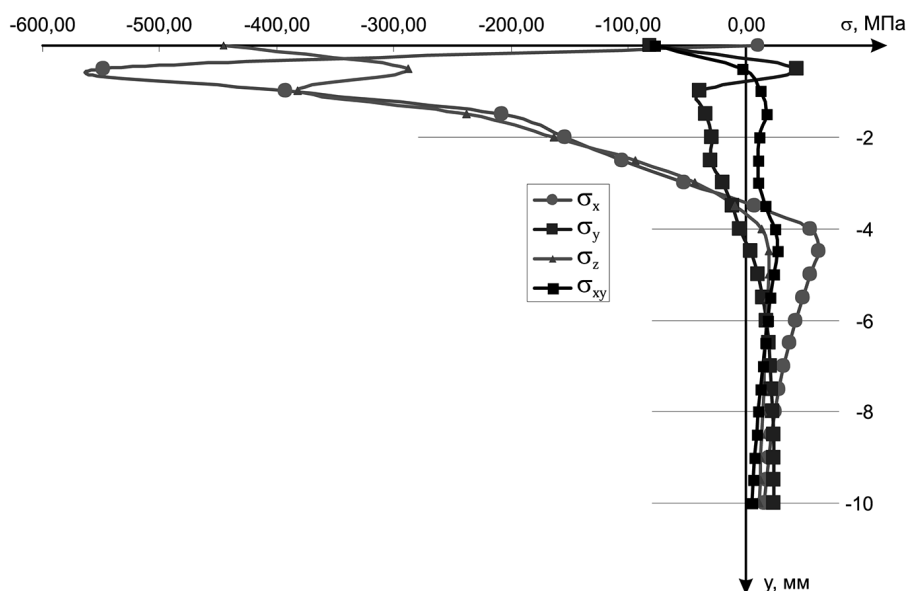


Рис. 4. Распределение компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после 300-го шага моделирования

Расчетные величины накопленных параметров механического состояния по обрабатываемой поверхности ($y = 0$ мм) представлены в табл. 3 (фрагмент). При выполнении расчетов приняты следующие параметры:

угол деформации в окружном направлении 10° (принят по данным В. М. Смелянского и В. Ю. Блюменштейна);

частота вращения детали 300 об/мин.

Таким образом, продолжительность одного оборота детали составила 0,2 с. Для принятого угла деформации время одного цикла, за который происходят нагрузка и разгрузка ПС, 0,0054 с. Половину этого периода осуществляется нагружение, а половину – разгрузка ПС, тогда принятое время нагружения и время разгрузки ПС детали 0,0027 с.

Результаты распределения компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после 300-го шага моделирования представлены на рис. 4.

Выводы

1. Наибольшие значения сжимающих напряжений (до -560 МПа, близкие к пределу текучести упрочненного металла) имеют осевую компоненту σ_x . Отметим, что компонента σ_x в наибольшей степени влияет на циклическую долговечность при эксплуатационном (усталостном) нагружении детали по схеме изгиба с вращением. Сжимающие напряжения σ_x на поверхности и в близлежащем слое, суммируясь с растягивающими эксплуатационными напряжениями, взаимно компенсируют друг друга, снижая тем самым тензор действующих напряжений. При этом осевая компонента обнаруживает экстремум сжимающих напряжений, расположенный на глубине 0,5 мм под поверхностью детали.

2. Тангенциальная компонента имеет сопоставимые с осевой компонентой значения сжимающих напряжений (до -450 МПа). Максимальные величины имеют место на поверхности детали.

3. Радиальная компонента σ_y характеризуется значительно меньшими по сравнению с осевой компонентой σ_x значениями при тех же глубинах распространения. На поверхности и в подповерхностном слое σ_y принимает преимущественно отрицательные значения, достигающие -100 МПа.

Полученные значения соответствуют экспериментальным данным В. М. Смелянского и Ч. Н. Абсара, по результатам исследований которых величина осевых остаточных напряжений при ППД достигает 800 МПа, окружных напряжений – до -400 МПа; радиальные напряжения близки к нулю [7, 8].

Небольшие значения σ_y , характерные для тензора ОН при ППД, не являются существенным недостатком в силу незначительного влияния этой компоненты на циклическую долговечность детали.

4. Нормальные компоненты тензора ОН характеризуются значительной (до $h = 4$ мм) глубиной распространения сжимающих напряжений, а также существенной (до $h = 7$ мм) глубиной распространения.

Результаты моделирования хорошо согласуются с данными Д. Д. Папшева, полученными для обработки ППД шариком. Автор подчеркивает возможность образования экстремума сжимающих ОН как на поверхности детали, так и на некоторой глубине в зависимости от степени воздействия тепловой разгрузки [9].

Литература

1. Иванов С. И., Павлов В. Ф. // Пробл. прочности. 1976. № 5. С. 25–27.
2. Махалов М. С., Блюменштейн В. Ю. // Вестник машиностроения. 2014. № 12. С. 21–25.
3. Блюменштейн В. Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М., 2007.
4. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М., 1963.
5. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М., 1977.
6. Овсенко А. Н., Gajek M. M., Серебряков В. И. Формирование состояния поверхностного слоя деталей машин технологическими методами. Ополе, 2001.
7. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М., 2002.
8. Чоудхури Мд. Н. Абсар. Разработка расчетной модели формирования остаточных напряжений и методики их технологического обеспечения при обработке деталей обкатыванием и выглаживанием: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1988.
9. Папшев Д. Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками. М., 1968.

V. Yu. BLUMENSTEIN, M. S. MAHALOV

INHERITANCE OF RESIDUAL STRESSES OF A SURFACE LAYER AT PROCESSES OF SURFACE PLASTIC DEFORMATIONS

Summary

A relevance of residual stresses (RS) research and computational algorithms creation in complex types of loading at the product lifecycle stages is shown. The RS forming finite element model at surface plastic deformation strengthening machining, including technological inheritance effect, is presented. The model feature is consideration of transformation of properties, obtained at previous production stages, as well as these properties evolution during metal particles displacement through the deformation space in the present loading step.